

Автоматизация калибровки резервуаров в промышленных системах управления технологическими процессами

В. Г. ДОМРАЧЕВ*, А. А. СКРИПНИК**

*Московский государственный университет леса, Москва, Россия, e-mail: vgdome@rambler.ru

**ООО «САОН—Система», Королев, Россия, e-mail: skripnik83@gmail.com

Рассмотрен метод установления зависимости объема горизонтальных и вертикальных резервуаров от уровня их наполнения с помощью системы автоматизированного управления технологическими процессами. Метод позволяет осуществить калибровку резервуаров при эксплуатации объекта без применения дополнительных технологических операций. Дан пример использования автоматизированной системы управления на предприятии, осуществляющем хранение и отпуск нефтепродуктов.

Ключевые слова: система измерения уровня, калибровка, регрессия, резервуары, система автоматизированного управления, компенсация температуры.

The method of determination of horizontal and vertical tanks volume dependence from filling level by means of automated control system is considered. Method allows to carry out the tanks calibration during operation without additional technological operations. An example of using the automated control system at the enterprise for storing and distribution of oil products is given.

Key words: level measuring system, calibration, regression, tanks, automated control system, temperature compensation.

Калибровка резервуаров является одной из наиболее трудоемких эксплуатационных процедур независимо от конструктивных особенностей резервуара и способа его монтажа (наземного или заглубленного), а также используемого метода (геометрического [1] или объемного (статического и динамического) [2]). Следствием этих различий в конструкции резервуаров и методов поверки может быть лишь некоторое относительное уменьшение или увеличение трудовых затрат и прочих сопутствующих издержек, но в любом случае поверка остается отдельной сложной технологической операцией, осуществить которую можно лишь при одновременном выполнении следующих условий: прекращении нормальной эксплуатации резервуара на время поверки; наличии квалифицированного технического персонала, прошедшего специальную подготовку, и значительного количества сертифицированной измерительной аппаратуры сравнительно высокого класса точности, большого количества поверочной жидкости, равного объему поверяемого резервуара, а также дополнительных технологических оснастки и оборудования (вплоть до специальных передвижных калибровочных установок).

Помимо выполнения указанных условий калибровка резервуаров существующими методами может дополнительно потребовать соблюдения специальных норм безопасности и, как следствие, специальных средств защиты персонала и измерительной аппаратуры, соответствующих этим нормам. Возможный ущерб окружающей среде, вызванный необходимостью утилизации больших объемов поверочных и промывочных жидкостей (в особенности загрязненной воды), а также затраты на его предотвращение должны учитываться при комплексной оценке экономической эффективности используемых методов поверки.

Известно также, что в процессе эксплуатации параметров резервуаров могут меняться под воздействием различ-

ных внешних факторов, вследствие чего искажается градуировочная характеристика.

Рассмотренные особенности делают актуальной задачу разработки новых, менее затратных наукоемких подходов к проведению калибровки резервуаров, особенно в процессе их эксплуатации. Одним из вариантов решения может стать предлагаемый метод калибровки резервуара с помощью комплекса автоматизированного управления технологическими процессами.

Метод основан на использовании оперативной информации, получаемой от системы измерения параметров жидкости в резервуаре, и данных о количестве нефтепродукта, прошедшего через счетчик жидкости. Информация о количестве нефтепродуктов на начало и конец налива и отпущенной дозе может служить для уточнения меняющейся в процессе эксплуатации зависимости объема от уровня жидкости в резервуаре.

Для описания сути метода необходимо дать пояснения по предлагаемой процедуре сбора данных.

В процессе работы топливозаправочного комплекса или нефтебазы автоматизированная система управления технологическими процессами ведет запись данных о состоянии налива. При достижении нижнего предельного уровня жидкости в резервуаре его заполняют путем приема нефтепродуктов. Далее происходит очередной цикл отпуска. В соответствии с предлагаемым методом в процессе каждого цикла с помощью имеющейся системы управления наливом получают массив данных вида

$$M = \{H_n, H_k, \Delta V, t\}_1, \{H_n, H_k, \Delta V, t\}_2, \dots, \{H_n, H_k, \Delta V, t\}_p, \dots, \{H_n, H_k, \Delta V, t\}_n,$$

где H_n, H_k — уровень на начало и конец отпуска; ΔV — доза отпущенного нефтепродукта; t — температура жидкости во

время отпуска нефтепродукта; i, n — номер и число операций отпуска.

На практике объемы отпущенных доз нефтепродукта значительно превышают объемы посантиметровой вместимости резервуаров и носят случайный характер. Для восстановления промежуточных значений объемов на каждый сантиметр уровня между H_n и H_k можно использовать интерполяционный полином Лагранжа, определяемый выражением

$$V(H) = \sum_{i=0}^n V_i Q_{n,i}(H),$$

где $Q_{n,i}(x)$ — полиномы степени n вида

$$Q_{n,i} = \prod_{j=1, j \neq i}^n \frac{(H-H_j)}{(H_i-H_j)}.$$

Опыт показывает, что градуировочная характеристика резервуаров представляет собой плавную меняющуюся кривую, поэтому для ее математического описания целесообразно использовать полиномы первой степени ($n = 1$).

Из вычисленных данных формируют новый массив M_Δ , состоящий из посантиметровых по уровню вместимостей резервуара от минимального уровня до максимального:

$$M_{\Delta V} = \{H_1, \Delta V_1, t_1\}, \{H_2, \Delta V_2, t_2\}, \dots, \{H_k, \Delta V_k, t_k\}, \dots, \{H_n, 0, t_n\},$$

здесь k — порядковый номер участка посантиметрового деления уровня в резервуаре, $H_k = H_1 + k-1$; ΔV_k — объем жидкости между уровнями H_k и H_{k+1} ; H_1 — уровень в резервуаре после отпуска последней дозы; t — температура жидкости во время отпуска; n — число градаций уровня; H_n — максимальный уровень наполнения.

В результате проведения n циклов отпуска и приема программное обеспечение комплекса управления формирует

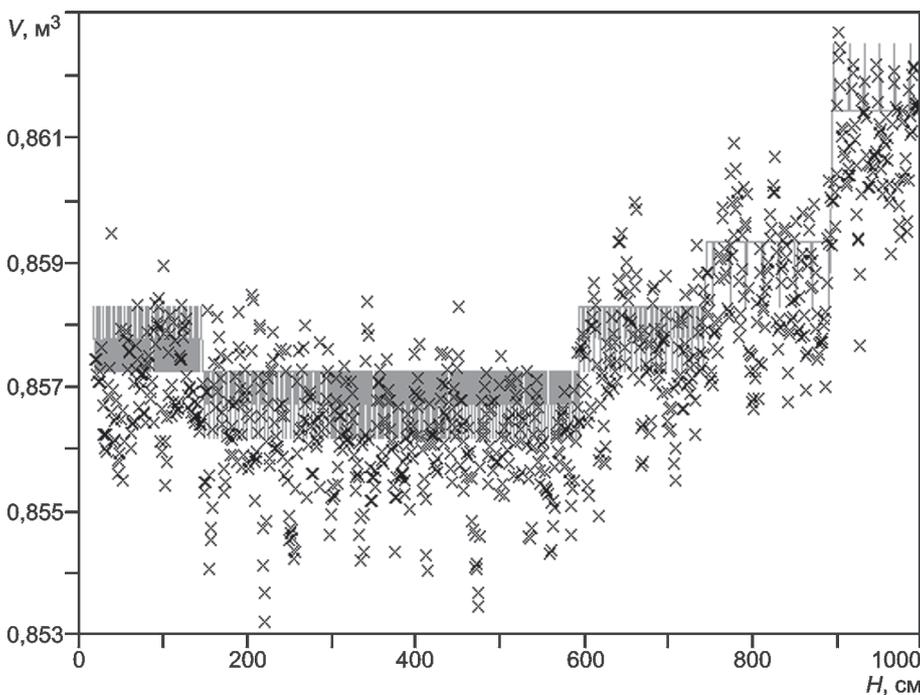


Рис. 1. Кривая посантиметровых вместимостей искомой градуировочной характеристики и точки $\Delta_{ср}$

матрицу данных, строками которой являются данные одного цикла отпуска нефтепродуктов (массив M_Δ). Введем обозначение $F_{ij} = \{H_{ij}, \Delta_{ij}, t_{ij}\}$, где H_{ij} — значение уровня в i -м цикле; j — порядковый номер значения; m — число операций отпуска в каждом цикле; t_{ij} — температура в процессе операции отпуска; Δ_{ij} — объем, содержащийся между уровнями H_{ij} и H_{ij+1} при температуре t_{ij} . Тогда

$$M_\Delta = \begin{pmatrix} - & F_{12} & F_{13} & F_{14} & \dots & F_{1m} \\ - & - & F_{23} & F_{24} & \dots & F_{2m} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & F_{34} & \dots & F_{3m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ - & F_{(n-1)2} & F_{(n-1)3} & F_{(n-1)4} & \dots & F_{(n-1)m} \\ - & - & - & F_{n4} & \dots & F_{nm} \end{pmatrix}.$$

При накоплении и обработке данных измерений строки заполняются справа налево, начиная с максимального значения уровня в резервуаре в сторону убывания. Пунктирной линией отмечен верхний предел «мертвой» полости резервуара. Объем данной полости является неизмеряемым остатком, в то же время это нижний пояс резервуара, мало подверженный влиянию внешних факторов. Таким образом, в качестве опорного значения объема, от которого в дальнейшем ведется расчет градуировочной таблицы, может быть выбран паспортный объем «мертвой» полости.

Так как отпускаемые дозы — случайные величины, то и H_1 может на разных этапах принимать случайные значения в пределах $0 < H_1 < H_{\min}$, где H_{\min} — верхний уровень «мертвой» полости резервуара. Значение H_{\max} определяется верхним предельным уровнем резервуара и является постоянной величиной.

В результате отказа от значений, лежащих ниже критического уровня (слева от пунктирной линии), матрица данных примет вид

$$\hat{M}_\Delta = \begin{pmatrix} F_{14} & F_{15} & \dots & F_{1m} \\ F_{24} & F_{25} & \dots & F_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{n4} & F_{n5} & \dots & F_{nm} \end{pmatrix}.$$

Для уменьшения влияния случайной погрешности необходимо провести усреднение значений Δ (элемент вектора F) в столбцах матрицы:

$$\Delta_{срj} = \sum_{i=1}^n \Delta_{j,i} / n.$$

По полученным усредненным данным можно построить зависимость разностей объемов на каждый сантиметр уровня от фактического значения уровня.

Сплошная линия на рис. 1 отражает искомую (идеальную) зависимость. Отдельные точки получены в результате усреднения столбцов матрицы M_Δ .

В процессе сбора данных для проведения калибровки температура может меняться в широких пределах, а градуировочная таблица резервуара должна быть приведена к стандартным условиям. Под воздействием температуры геометрия резервуара меняется, что вносит погрешность в результаты расчета. Таким образом, при условии, что температура окружающей среды может принимать значения в диапазоне от -40 до $+40$ °C, а градуировочная таблица согласно [2] должна быть приведена к 20 °C [3], при простом усреднении точки полученной градуировочной характеристики будут лежать на графике ниже реальной. Для учета влияния температуры на геометрию резервуара предлагается установить зависимость значений Δ для столбцов матрицы \hat{M}_Δ от температуры, применив механизм линейной регрессии.

На практике линию регрессии чаще всего ищут в виде линейной функции $\hat{Y} = b_0 + b_1 X$, наилучшим способом описывающей искомую кривую. Делается это с помощью метода наименьших квадратов

$$f = \sum_{i=1}^n (\Delta V_i - \Delta \hat{V}_i)^2 \rightarrow \min,$$

где ΔV_i — полученное значение объема; $\Delta \hat{V}_i$ — значение объема, найденное из уравнения регрессии.

Метод наименьших квадратов заключается в поиске зависимости, минимизирующей разность значений искомой функции и фактического значения. Условием минимума является

$$\begin{cases} \frac{df}{db_0} = 0; \\ \frac{df}{db_1} = 0 \end{cases} \text{ или } \begin{cases} -2 \sum_{i=0}^n (\Delta V_i - b_0 - b_1 t_i) = 0; \\ -2 \sum_{i=0}^n (\Delta V_i - b_0 - b_1 t_i) t_i = 0 \end{cases}$$

$$\text{или } \begin{cases} nb_0 + b_1 \sum_{i=0}^n t_i - \sum_{i=0}^n \Delta V_i = 0; \\ b_0 \sum_{i=0}^n t_i + b_1 \sum_{i=0}^n t_i^2 - \sum_{i=0}^n \Delta V_i t_i = 0. \end{cases}$$

Решив полученную систему линейных уравнений относительно b_0 и b_1 , найдем коэффициенты регрессии. В результате проведенных вычислений получим вектор значений $\alpha = \{(b_{0_1}, b_{1_1}); \dots; (b_{0_n}, b_{1_n})\}$, где n — число градаций уровня (количество столбцов матрицы \hat{M}_Δ). Свободные члены b_0 связаны с площадью сечения резервуара, которая в общем случае может зависеть от уровня. Коэффициенты b_1 характеризуют температурный коэффициент объемного расширения резервуара (постоянную величину). Поскольку значения коэффициентов b_1 определяются на основе случайных значений ΔV_i , то и сами они являются случайными вели-

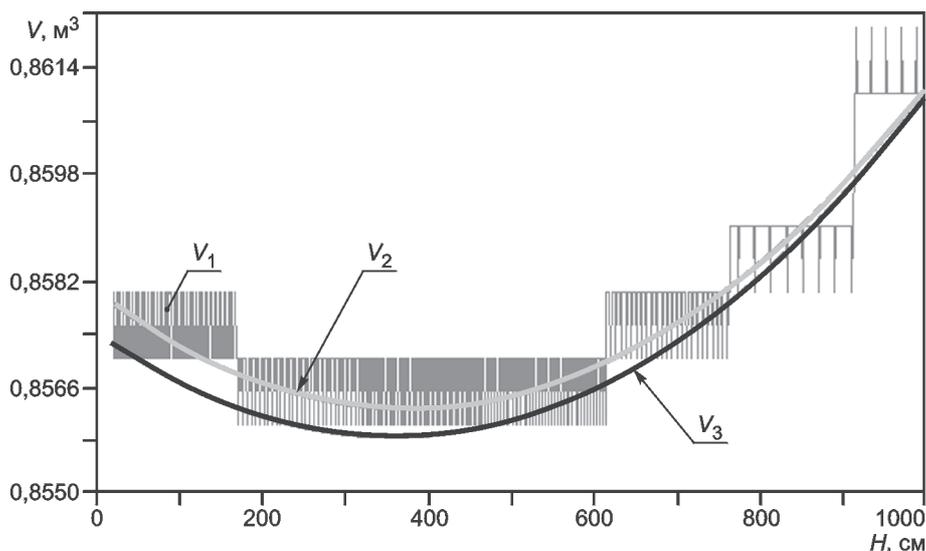


Рис. 2. Аппроксимация полученных данных

чинами. Таким образом, для дальнейших расчетов предлагается использовать среднее значение коэффициента b_1 :

$$b_{cp} = \sum_{j=1}^n \Delta_{j,i} / n,$$

где i — порядковый номер элемента вектора α ; n — число элементов вектора.

На основании полученных данных рассчитываются элементы вектора разниц объемов, приведенных к температуре 20 °C:

$$\Delta \hat{V}_i = \Delta V_i (1 + b_{cp}(t_0 - t_{cp})),$$

где t_0 — температура приведения; t_{cp} — средняя температура жидкости в резервуаре во время сбора данных для расчета градуировочной характеристики.

Для приближения значений ΔV_i к гладкой кривой предлагается использовать математический аппарат полиномиальной регрессии. На рис. 2 показаны результаты аппроксимации: V_1 — кривая посантиметровых вместимостей искомой градуировочной характеристики; V_2, V_3 — кривые, найденные в результате вычисления полиномиальной регрессии по данным $\Delta \hat{V}_i$ и ΔV_i .

Используя полученные данные, можно рассчитать значения градуировочной таблицы резервуара, начиная с верхнего предела «мертвой» полости:

$$V_0 = V_{\text{пасл}}(H_{\text{мертв}});$$

$$V_i = V_{i-1} + \Delta \hat{V}_{i-1},$$

где i — порядковый номер градации уровня.

Градуировочная таблица может быть использована для определения объема нефтепродукта в резервуаре по измеренному уровню.

Для каждой точки градуировочной таблицы можно рассчитать погрешность (отклонение расчетной характеристики от идеальной) $\Delta X_i = V_i^0 - \hat{V}_i$.

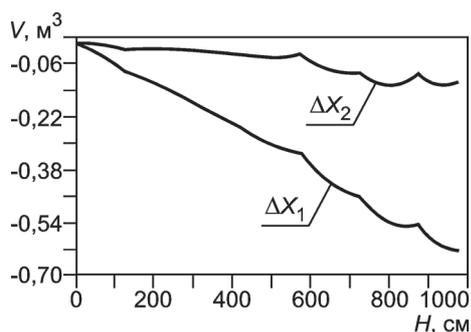


Рис. 3. Отклонения расчетной градуировочной характеристики резервуара от идеальной в зависимости от уровня нефтепродуктов

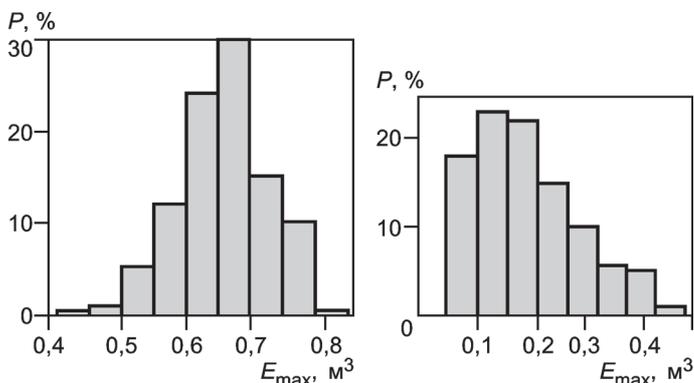


Рис. 4. Плотности распределения вероятностей максимальной погрешности при различных подходах к обработке данных

На рис. 3 представлена зависимость погрешности уровня; ΔX_1 , ΔX_2 — графики отклонений, полученные по данным ΔV_i и $\Delta \hat{V}_i$, соответственно.

В качестве исходных данных для моделирования были выбраны следующие параметры.

Градуировочная таблица.... реальная таблица резервуара РВС-1000	
Минимальный уровень	200 мм
Максимальный уровень	1000 мм
Абсолютная погрешность измерения уровня	± 1 мм
Абсолютная погрешность измерения температуры	$\pm 0,5$ °С
Относительная погрешность счетчика жидкости	0,25 %
Диапазон температуры в процессе сбора данных	-40...+40 °С

Для проведения моделирования принято, что законы распределения погрешностей приборов являются нормальными. Температура выбирается из представленного диапазона по равновероятному закону.

Из рис. 3 следует, что градуировочная характеристика, полученная с использованием предложенного алгоритма коррекции влияния температуры, дает существенно меньшие отклонения по сравнению с расчетом, не учитывающим ее влияния. График построен на основе моделирования распространенного на практике стального вертикального резервуара типа РВС-1000 с 10 циклами наполнения и опорожнения. Максимальная абсолютная погрешность без

температурной коррекции составила 630 л, в то время как применение описанного метода позволило снизить отклонение расчетной характеристики от идеальной до 140 л. Флуктуации отклонений кривых вызваны тем, что полиномиальная регрессия не учитывает скачков градуировочной кривой в точках перехода между поясами резервуара.

Для определения статистических характеристик точности метода следует построить графики плотностей распределения вероятности максимальной погрешности E_{max} :

$$E_{max\ i} = \max(|\Delta X_i|),$$

где i — порядковый номер эксперимента; ΔX — функция отклонений расчетной градуировочной характеристики от идеальной.

На рис. 4 представлены гистограммы плотностей вероятностей распределения максимальной погрешности без сглаживания и температурной коррекции и с их применением. По оси абсцисс отложена максимальная погрешность, по оси ординат — вероятность попадания в заданный интервал. Число интервалов выбрано в соответствии с формулой Старджеса [4]:

$$N = 3,3 \lg(m + 1),$$

где N — число интервалов; m — число испытаний.

Моделирование проводилось по 300 точкам ($m = 300$), таким образом, $N = 9$.

Полученный результат позволяет говорить о том, что рассмотренный метод коррекции температуры чувствителен к большим значениям погрешности, т. е. чем больше погрешность, тем меньше вероятность ее появления.

Таким образом, предложенный метод, основанный на использовании возможностей существующих систем автоматизированного управления технологическими процессами, имеющих в своем составе измерительные системы параметров нефтепродуктов в резервуарном парке и контроллеры управления установками налива с объемными счетчиками жидкости, позволяет проводить калибровку резервуаров без каких-либо дополнительных операций и остановки работы объекта. Компенсация влияния температуры дает возможность использовать предложенный метод на больших (500 м³ и более) резервуарах, не являющихся подземными, а следовательно, испытывающих влияние меняющейся в широких пределах температуры окружающей среды.

Литература

1. **ГОСТ 8.570—2000.** ГСИ. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки.
2. **ГОСТ 8.346—2000.** ГСИ. Резервуары стальные горизонтальные цилиндрические. Методика поверки.
3. **ГОСТ 8.595—2004.** ГСИ. Масса нефти и нефтепродуктов.
4. **Новицкий П. В., Зограф И. А.** Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: Энергоатомиздат, 1991.

Дата принятия 15.05.2012 г.